

ارزیابی تاثیر مشخصات آلیاژهای حافظه دار شکلی در بهبود رفتار سازه های بتنی

امین حجتی راد^{۱*}، حسین نادر پور^۲

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

۲- دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

* نویسنده مسئول

a.hojatirad@semnan.ac.ir

چکیده:

وجود خطوط گسل مختلف در ایران و نقاط مختلف دنیا سبب شده، سازه ها و پلهایی که در نواحی با خطر لرزه‌ای زیاد وجود دارند، مستعد خرابی‌های شدید و فروپاشی به دلیل تغییر شکل‌های بسیار زیاد در حین زلزله باشند. استفاده از آلیاژهای حافظه‌دار شکلی به دلیل داشتن رفتار حافظه شکلی، قادر به حذف کرنش‌های پسماند به کمک اعمال دما می‌باشند. به دلیل تفاوت خواص مکانیکی آلیاژهای حافظه‌دار شکلی در مقایسه با فولاد معمولی، مانند داشتن عمر خستگی طولانی، ظرفیت بیشتر، ضریب کشسانی کمتر و حلقه‌های کوچک هیستریک استفاده از این آلیاژها به‌عنوان میلگرد در بتن سبب تغییرات در پاسخ سازه، تحت بارهای لرزه‌ای می‌شود. استفاده از این آلیاژها به‌عنوان میلگرد در سازه‌های بتنی در میان پژوهشگران به تدریج در حال افزایش است. این تحقیق قصد دارد تا با معرفی کاربردی و نظری این آلیاژها و بررسی مقالات و مراجع متعدد بین‌المللی که در این راستا و در بهبود عملکرد سازه تلاش به سزایی کرده‌اند، دروازه‌ای جدید به روی محققان و مهندسين سازه بگشاید تا با استفاده از این آلیاژها از خرابی‌های احتمالی در آینده جلوگیری بعمل آید.

کلمات کلیدی: آلیاژهای حافظه‌دار شکلی، سازه‌های بتنی، اتصال تیر-ستون سازه بتنی، دیوار برشی بتنی، رفتار فوق ارتجاعی

۱- مقدمه

آیین‌نامه‌های طراحی حاضر، تأکید دارند که سازه‌های مقاوم در برابر زلزله به‌اندازه کافی به‌وسیله جزئیات آرماتور گذاری مناسب در نواحی بحرانی شکل‌پذیر باشند تا از رفتار کشسان سازه تحت زلزله‌های متوسط مطمئن شوند. هرچند که ساخت سازه‌هایی که بتوانند تحت حرکت‌های شدید زمین، به‌صورت کشسان عمل کنند بسیار دشوار و پرهزینه است. در طراحی لرزه‌ای مرسوم سازه‌های بتن مسلح، انتظار می‌رود که آرماتورها به حد تسلیم برسند تا با تغییر شکل‌های دائمی آرماتورهای فولادی پس از تسلیم و خرابی بتن غیر محصور، انرژی مستهلک گردد. لرزه‌های با مقیاس بزرگ باعث خرابی‌های شدید زیر سازه، فروپاشی ساختمان‌ها، بسته شدن پل‌ها، اختلال در عملکرد گروه‌های امداد و نجات و در نهایت آسیب‌های جدی اقتصادی می‌شود. درحالی‌که سازه‌ها بعد از چنین زمین‌لرزه‌هایی قابل سرویس‌دهی باشند، از بسیاری از این فجایع جلوگیری می‌شود. سیستم‌های هوشمند برای سازه‌های عمرانی، سیستم‌هایی هستند که به‌طور خودکار می‌توانند مشخصات سازه‌ای را در پاسخ به اختلالات خارجی و یا بارهای شدید غیرمنتظره بر ضد ایمنی سازه، افزایش عمر سازه و خدمت‌پذیری آن تعدیل کنند. یک فناوری کلیدی در تحقق این هدف، توسعه و به‌کارگیری مصالح هوشمند^۱ است که می‌توانند در سازه‌ها بکار گرفته شوند.

آلیاژ حافظه‌دار شکلی (SMA) فوق کشسان^۲، ماده‌ای ویژه‌ای است که قادر به تحمل تغییر شکل‌های غیر کشسان بزرگ است که شکل اصلی خود را با برداشت تنش بازمی‌یابد. به‌طور مثال زمانی که به یک فنر نیرو وارد کنیم، فنر تغییر شکل می‌دهد و در آن کرنش ایجاد می‌شود اما زمانی که فنر را رها کنیم و کمی به آن گرمادهیم فنر به حالت اول خود برگشته و دارای کمترین کرنش پسماند خواهد بود. بنابراین این نوع آلیاژها می‌توانند نقطه روشنی برای مشکل تغییر شکل‌های دائمی باشد. اثر حافظه شکلی و خاصیت فوق کشسان دو ویژگی اختصاصی این آلیاژهاست که در مهندسی سازه امکان

¹ Inteligent Materials

² Shape Memory Alloy

³ Superelastic

کاربرد این آلیاژها به عنوان مستهلک کننده‌های انرژی، رفع کننده و یا کاهش‌دهنده تغییر شکل‌ها، ایجادکننده پیش و پس کرنش در المان‌های سازه‌ای را فراهم می‌نمایند. حد خستگی بالا و مقاومت مناسب در برابر عوامل خوردنده از دیگر برتری‌های این آلیاژهاست. در کنار این امتیازات قابل توجه قیمت بالا، مشکل بودن فرایند تولید، عدم بروز خواص کامل حافظه‌داری در المان‌های سازه‌ای با سطح مقطع واقعی، تفاوت رفتار در فشار و کشش را می‌توان از جمله کاستی‌های این آلیاژها دانست که در کاربرد آن‌ها باید مدنظر قرار گیرند.

المان‌های دیوار برشی و اتصالات تیر-ستون مسلح شده با آلیاژ حافظه‌دار به مهندسان سازه اجازه می‌دهند تا سازه‌های بتن مسلح را به گونه‌ای طراحی کنند که خرابی کم و کاهش تعمیرات پس از زمین‌لرزه را دارا باشند. آلیاژ حافظه‌دار، ضریب کشسانی و حلقه‌های هیستریک نسبتاً کوچک‌تری در مقایسه با فولاد دارد، بنابراین استفاده از آلیاژ حافظه‌دار در مقاطع بتن مسلح ممکن است تغییرات قابل توجهی در رفتار این نوع سازه‌ها را نتیجه دهد [۱ و ۲].

۲- مبانی نظری آلیاژهای حافظه‌دار شکلی

آلیاژهای حافظه‌دار شکلی (SMAs) مصالحی هوشمند و نوین می‌باشند که به دلیل رفتارهای منحصر به فردی که از خودشان نشان می‌دهند، در چند دهه اخیر کاربردهای متفاوتی در زمینه‌های مختلف علوم و مهندسی پیدا کرده‌اند. قابلیت تغییر فاز بازگشت‌پذیر این آلیاژها سبب می‌شود که بتوانند تغییر شکل‌های زیادی را متحمل شوند و بسته به شرایط دمایی و تنش موجود، در صورت بارگذاری یا باربرداری به همراه اعمال گرما به شکل اولیه خود بازگردند [۳]. این قابلیت که با تغییر در خواص مکانیکی، حرارتی و الکتریکی آلیاژ همراه است، موجب شده که آلیاژهای حافظه‌دار شکلی به عنوان گزینه‌ای مناسب جهت کاربرد در سازه‌های هوشمند، پیشرفته و انطباق‌پذیر مدنظر قرار گیرند. برخی از مهم‌ترین آلیاژهای حافظه‌دار در جدول (۱) [۴ و ۵] آمده است.

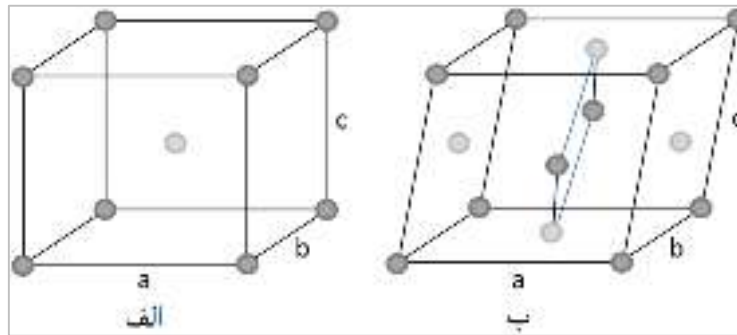
جدول ۱- برخی از مهم‌ترین آلیاژهای حافظه‌دار [۴ و ۵]

آلیاژ پایه مس	آلیاژ پایه نیکل	آلیاژ پایه آهن	انواع دیگر آلیاژها
Cu-Zn	Ni-Al	Fe-Ni-Co-Ti	Au-Cd
Cu-Zn-Al			
Cu-Zn-Ga		Ag-Cd	Fe-Pt
Cu-Zn-Sn			
Cu-Zn-Si	Ni-Ti	Fe-Pd	Mn-Si-Nr-Ci
Cu-Al-Ni			
Cu-Au-Zn		Fe-Mn-Si	
Cu-Sn			

پرکاربردترین نوع SMA در صنعت، تاکنون آلیاژ نیکل و تیتانیوم (نیتینول - NiTi) بوده است که در صنعت ساختمان عموماً برای کاربردهای لرزه‌ای نظیر کنترل غیرفعال ارتعاشات و استهلاک انرژی استفاده شده است. با این وجود هزینه‌های زیاد تولید و عمل‌آوری این آلیاژ مانع کاربرد آن در صنعت ساخت‌وساز در مقیاس‌های عظیم می‌گردد. در سال‌های اخیر از آلیاژهای حافظه‌دار شکلی بر پایه آهن (Fe-SMAs) در زمینه ترمیم و تقویت سازه‌ها توسط تاندون‌های پیش‌تنیده Fe-SMA پیش روی ما قرار داده است [۶].

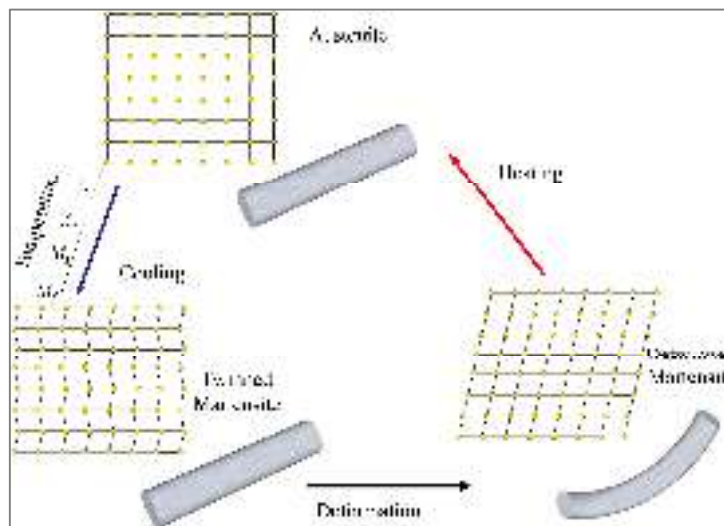
۲-۱- فازهای مختلف آلیاژهای حافظه‌دار شکلی

آلیاژهای حافظه‌دار شکلی در دو فاز کریستالی به نام‌های آستنیت^۱ و مارتنزیت^۲ مطابق شکل (۱) [۴] موجود می‌باشند. حالت آستنیت حالت اصلی با تقارن بالا بوده و در دماهای زیاد و تنش‌های کم پایدار می‌باشد. حال آنکه حالت مارتنزیت حالت محصول و با تقارن کمتر است و در دماهای کم و تنش‌های زیاد پایدار است. با اعمال بارگذاری‌های حرارتی و یا مکانیکی این دو فاز می‌توانند به یکدیگر تبدیل شوند. این تبدیل برگشت‌پذیر فازها، تبدیل مارتنزیتی نامیده می‌شود که تمامی خصوصیات رفتاری آلیاژهای حافظه‌دار شکلی را تحت تأثیر قرار می‌دهد و آن‌ها را به‌عنوان یک ماده هوشمند مطرح می‌کند.



شکل ۱- فازهای کریستالی (الف) فاز آستنیت، (ب) فاز مارتنزیت. (اتم‌های خاکستری روشن تیتانیوم و اتم‌های خاکستری تیره نیکل هستند.) [۴]

همان‌گونه که ذکر شد، تبدیل مارتنزیتی در آلیاژهای حافظه‌دار شکلی ترموالاستیک می‌تواند هم توسط اعمال تنش و هم با تغییر دمای آلیاژ صورت گیرد. شکل زیر تبدیل مارتنزیتی ناشی از تغییر دما و بدو اعمال تنش را نشان می‌دهد. SMA دارای چهار دمای مشخصه M_s ، A_s ، M_f و M_s است که به ترتیب دمای آغاز حالت آستنیت، دمای پایان حالت آستنیت، دمای آغاز حالت مارتنزیت و دمای پایان حالت مارتنزیت می‌باشند. تبدیلات مارتنزیتی، یک هیستریزس گرمایی را تشکیل می‌دهند و این بدین معنا است که تبدیل مستقیم و معکوس هر دو در یک دما رخ نمی‌دهند. در شکل (۲) [۷] به دو روش این موضوع نشان داده شده است.



شکل ۲- تغییر فاز از حالت مارتنزیت به آستنیت و بالعکس بر اثر اعمال گرما [۷]

با توجه به شکل در تبدیل مستقیم زمانی که ماده تحت کاهش دما قرار می‌گیرد، تا زمانی که ماده به دمای M_s نرسیده است، در حالت کاملاً آستنیت قرار دارد. هنگامی که به دمای M_s می‌رسد، کریستال‌های آستنیت شروع به تبدیل شدن به مارتنزیت می‌کنند و زمانی که ماده به دمای M_f می‌رسد،

¹ Austenite
² Martensite

تبدیل از آستنیت به مارتنزیت کامل شده است. در تبدیل مستقیم در دماهای بین M_s و M_f ، ماده به صورت ترکیبی از آستنیت و مارتنزیت است. در تبدیل معکوس که با افزایش دما همراه است، تا زمانی که ماده به دمای A_s نرسیده به صورت کاملاً مارتنزیت است. زمانی که به A_s می‌رسد، تبدیل از آستنیت به مارتنزیت آغاز شده و سرانجام که به دمای A_f می‌رسد، کاملاً به حالت آستنیت درمی‌آید و تبدیل فاز پایان می‌پذیرد. مارتنزیت ایجاد شده توسط تغییر دما، مارتنزیت پیچ‌خورده^۱ و مارتنزیت ایجاد شده توسط تغییر تنش، مارتنزیت پس پیچ‌خورده نامیده می‌شود. در تبدیل ساختار کریستالی آستنیت به مارتنزیت پیچ‌خورده، تغییر شکل ماکروسکوپی ماده ناچیز است. مارتنزیت پس پیچ‌خورده، با اعمال تنش به مارتنزیت پیچ‌خورده تبدیل می‌شود [۳]. طی این تبدیل، بدون اینکه هیچ لغزش واقعی به معنای آسیب به ماده وارد شود، شکل‌پذیری آن به طور قابل توجهی افزایش یافته، آلیاژ به حداکثر تغییر طول خود می‌رسد و کرنش شبه خمیری در مارتنزیت ایجاد می‌شود. زمانی که باربرداری صورت می‌گیرد، مارتنزیت به صورت پس پیچ‌خورده باقی می‌ماند و کرنش ایجاد شده در آن به جز مقدار اندکی کرنش کشسان، برگشت‌پذیر نیست. این کرنش پسماند می‌تواند با اعمال دمای بیشتر از A_f به ماده، حذف شود. شکل (۳) [۳] ساختار آستنیت و دو نوع مارتنزیت ذکر شده را نشان می‌دهد.

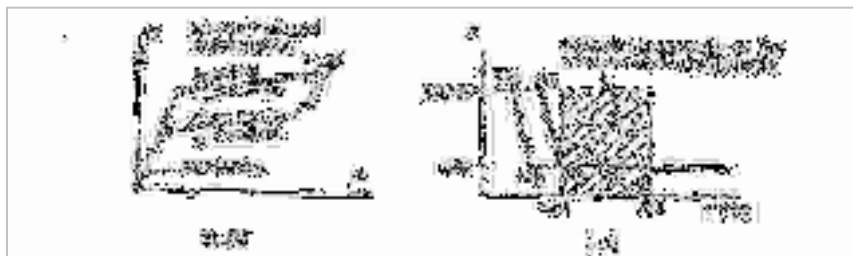


شکل ۳- تشکیل و تغییر شکل مارتنزیت در یک آلیاژ حافظه‌دار شکلی ترموالاستیک: الف) ساختار کریستالی آستنیت ($T > M_s$)، ب) مارتنزیت پیچ‌خورده ناشی از کاهش دما ($T < M_f$)، ج) تغییر ساختار گونه‌های مارتنزیت پیچ‌خورده با اعمال تغییر شکل ($T < M_f$)، د) مارتنزیت پس پیچ‌خورده شامل یک نوع مارتنزیت ($T < M_f$) [۳]

۲-۲- رفتارهای مختلف آلیاژهای حافظه‌دار شکلی

۱-۲-۲- رفتار فوق کشسان

اعمال تنش به SMA که در حالت اولیه آستنیت قرار دارد و دمای آن بالاتر از A_f است، موجب می‌شود که آستنیت به مارتنزیت پس پیچ‌خورده تبدیل شود، زیرا که آستنیت در تنش‌های زیاد پایدار نیست. منحنی تنش - کرنش این تبدیل شامل سه قسمت است که عبارت‌اند از: یک شاخه کشسان اولیه با ضریب کشسانی اولیه آستنیت، یک قسمت افقی که تبدیل فاز از آستنیت به مارتنزیت در این قسمت رخ می‌دهد و بار دیگر یک شاخه کشسان با ضریب کشسانی اولیه مارتنزیت در هنگام باربرداری، مارتنزیت ناپایدار می‌شود و تبدیل معکوس رخ می‌دهد [۸] و ماده بدون هیچ کرنش پسماندی به شکل اولیه خود بازمی‌گردد. تبدیل معکوس از روی یک مسیر متفاوت ماده را به مکان اولیه می‌رساند و بنابراین یک هیستریزس تشکیل می‌شود که مساحت آن مصرف انرژی اتلافی است. این رفتار را رفتار فوق کشسان یا شبه کشسان می‌نامند زیرا طی آن هیچ کرنش پسماندی بر روی ماده باقی نمی‌ماند. اگر دمای SMA بیشتر از M_d (بیشینه دمایی که مارتنزیت در اثر اعمال تنش می‌تواند در آن ایجاد شود) باشد، رفتار آلیاژ پس از یک تغییر شکل کشسان اولیه، خمیری خواهد شد (همانند رفتار فولاد معمولی) رفتار فوق کشسان در شکل (۴) [۳۰] نشان داده شده است.



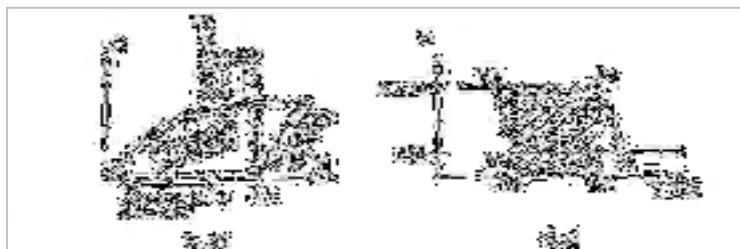
¹ Twinned Martensite

² Detwinned Martensite

شکل ۴- الف) نمودار تنش- کرنش، ب) پروفیل دمای مربوط به رفتار فوق کشسان در تنش صفر (پارامتر Z معرف نسبت مارتنزیت و T دما است). [۳۰]

۲-۲-۲- رفتار حافظه شکلی

زمانی که SMA در دمایی کمتر از A_s تحت بارگذاری قرار بگیرد، به دلیل پایدار بودن مارتنزیت در دماهای کم، پس از باربرداری تغییر فاز صورت نمی‌گیرد. همچنین کرنش خمیری در مارتنزیت ایجاد می‌شود که به هنگام باربرداری قابل بازگشت نیست. با این حال، کرنش پسماند تولید شده می‌تواند با اعمال دمای بالاتر از A_f به طور کامل حذف شود. از آنجاکه این مواد شکل اولیه خود را به یاد داشته و می‌توانند پس از اعمال دما به شکل اولیه خود بازگردند، این خاصیت، رفتار حافظه شکلی (SME) یا شبه خمیری نام‌گرفته است. در شکل (۵) [۳۰] رفتار حافظه شکلی و دمایی که این رفتار در آن به وقوع می‌پیوندد، ارائه شده است.

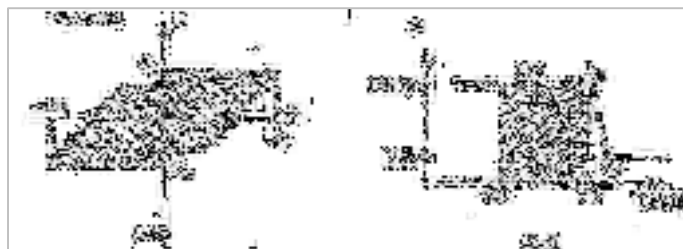


شکل ۵- الف) نمودار تنش- کرنش، ب) پروفیل دمای مربوط به رفتار حافظه شکلی در تنش صفر (پارامتر Z معرف نسبت مارتنزیت و T دما است). [۳۰]

همان‌طور که در شکل بالا نشان داده شده است، اگر در حین ایجاد اثر حافظه شکلی و در هنگام اعمال حرارت، به ماده اجازه تغییر شکل بازگردانده داده نشود، به عنوان مثال با مقید شدن SMA در بتن، در آن تنش ایجاد خواهد شد. از این تنش که به تنش بازگردانی موسوم است، می‌توان برای پیش‌تنیده کردن یک تیر بتنی استفاده کرد.

۳-۲-۲- میرایی مارتنزیتی

زمانی که SMA در حالت مارتنزیت تحت تنشی بیشتر از تنش تسلیم قرار گیرد، به دلیل تغییر تدریجی جهت‌گیری گونه‌های مارتنزیت، ظرفیت استهلاک انرژی زیادی از خود نشان می‌دهد. این خاصیت در شکل (۶) [۳۰] نمایش داده شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود در بارگذاری رفت و برگشتی هیستریزیس بزرگی تشکیل خواهد شد که مساحت آن برابر انرژی تلف شده است.



شکل ۶- الف) نمودار هیستریزیس SMA، ب) پروفیل دمای مربوط به میرایی مارتنزیتی در تنش صفر (پارامتر Z معرف نسبت مارتنزیت و T دما است). [۳۰]

این خاصیت مهم سبب شده است که SMA در کنترل غیرفعال سازه‌ها جایگاه ویژه‌ای پیدا کند. قابلیت استهلاک انرژی این مواد، تقاضا را بر روی اعضای اصلی سازه کاهش می‌دهد و از آنجایی که این مواد دارای مقاومت بسیار بالایی در مقابل خستگی هستند، می‌توانند پس از زلزله نیز مورد استفاده قرار گیرند و نیازی به تعویض آن‌ها نیست.

¹ Shape Memory Effect

۳- تاریخچه تحقیقات استفاده از SMA در سازه های بتنی

اولین مشاهدات از رفتار حافظه دار شکلی در سال ۱۹۳۲ توسط اولاندر^۱ [۹] انجام شد. در مطالعه اش درباره اثر لاستیک مانند نمونه های طلا و کادمیم را مورد بررسی قرار داد. در سال ۱۹۳۸ توسط گرینگر و مورادیان^۲ [۱۰] در مطالعه خود بر روی آلیاژهای برنج، مس و روی کار کردند. سال ها بعد (۱۹۵۱) چانگ و رید^۴ [۱۱] برای اولین بار اصطلاح حافظه شکلی^۵ را به کار بردند. در سال ۱۹۶۲ بوهرلر و وایلی^۶ [۱۲] و همکارانش در آزمایشگاه مهمات نیروی دریایی آمریکا اثر حافظه دار شکلی را در آلیاژ نیکل و تیتانیوم (NiTi) کشف کردند و نام ماده را به دلیل محل کارشان نیتینول (NiTiNOL) گذاشتند [۱ و ۲].

در سال ۱۹۶۷ بوهرلر و همکارانش [۱۳] تحقیقات گسترده خود را بر روی نایتینول و کاربردهای تجاری فراوان در صنایع ارائه دادند. اورنگا و همکارش با استفاده از خاصیت اثر حافظه شکلی آلیاژهای حافظه دار توانایی این آلیاژها در ایجاد پیش تنیدگی در تیر بتنی را در مطالعه ای آزمایشگاهی گزارش نمودند. لی و همکارانش در یک بررسی آزمایشگاهی قابلیت اثر حافظه شکلی آلیاژ نایتینول در کاهش تغییر شکلها و عرض ترکها در تیر بتن مسلح را پس از بارگذاری و اعمال حرارت به آلیاژ ثبت نمودند. بررسی های انجام شده در مورد کاربرد آلیاژهای حافظه دار شکلی در سازه های بتن مسلح نیز به لحاظ کمی و کیفی جالب توجه می باشد که در ادامه با ذکر مقالات موردنظر بیان می شود.

۳-۱- تأثیر آلیاژهای حافظه دار شکلی بر ستون های بتنی

آلام^۸ و بیلا^۹ در سال ۲۰۱۲ [۱۴]، عملکرد لرزه ای ستون های بتنی تقویت شده با آلیاژ حافظه دار شکلی (SMA) و میله های پلیمر تقویت شده (FRP) را مورد بررسی قرار دادند. این پژوهش بیانگر این موضوع است که SMA در ستون ها تأثیر و کارایی مناسب را دارد. چون فولاد، مقاومتی در مقابل خوردگی ندارد، منجر به شکست می شود، به همین دلیل از نوار پلیمری تقویت شده (FRP) برای حل این مشکل استفاده می شود و چون FRP به دلیل ترد بودن وارد ناحیه خمیری نمی شود و به صورت ناگهانی گسیخته می شود در نواحی خمیری موجود در سازه از SMA به دلیل رفتار منحصربفرد در تغییر شکل های بزرگ استفاده می شود. در این پژوهش نه تنها اثر SMA بلکه اثر آرماتورهای FRP و آرماتورهای پیش تنیده فولادی نیز در یک ستون مورد بررسی قرار گرفت. چهار مدل آرماتورگذاری برای ستون خود پیشنهاد کردند. در مدل اول تمام آرماتورهای ستون از نوع فولاد پیش تنیده است. مدل دوم ترکیبی از SMA و فولاد پیش تنیده است. مدل سوم همانند مدل دوم است با این تفاوت که بجای آرماتورهای SMA از میلگرد FRP استفاده شده است. مدل چهارم ادغامی از SMA و FRP می باشد و در آن آرماتور فولادی وجود ندارد. شکل (۷) [۱۴] نحوه اتصال SMA و FRP را به هم نشان می دهد.

^۱Olander

^۲Rubber Like Effect

^۳Greninger and Mooradian

^۴Chang and Read

^۵Shape Recovery

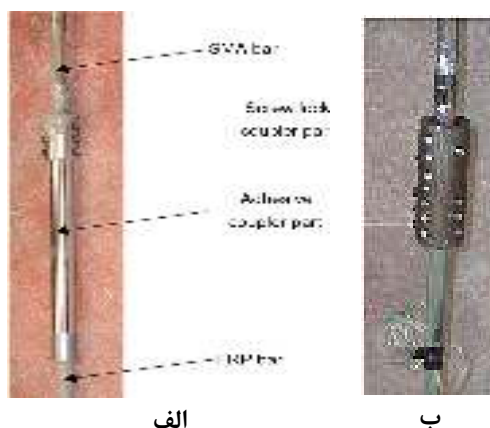
^۶William J. Buehler and wiley

^۷Nickel-Titanium Naval Ordnance Laboratory

^۸Alam

^۹Billah

^۱Fiber Reinforced Polymer

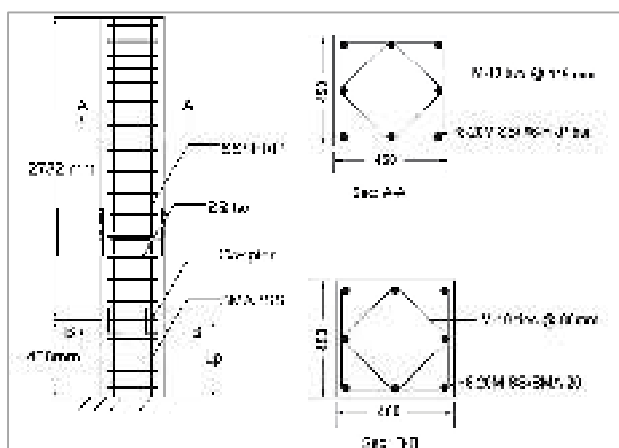


الف

ب

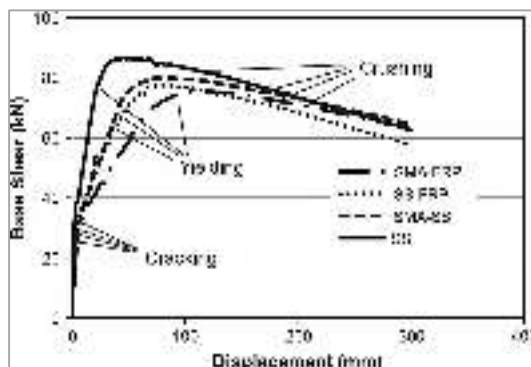
شکل ۷- الف) اتصال SMA و FRP ب) اتصال SMA و آرماتور فولادی پیش تنیده [۱۴]

برای راحتی کار مدل های اول تا چهارم به ترتیب به نام های SS، SMA-SS، SS-FRP، SMA-FRP نامگذاری شده است. در شکل (۸) [۱۴] یک نمونه ستون مطالعاتی به همراه مکان هایی که در آن ها آرماتورهای مختلف قرار می گیرند نشان داده شده است.



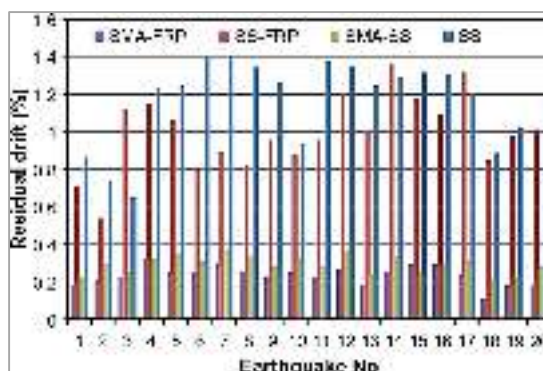
شکل ۸- جزئیات ستون مورد مطالعه [۱۴]

آلام و بیلازه علاوه بر برش پایه، سازه را مورد تحلیل دینامیکی غیرخطی قرار دادند. شکل (۹) [۱۴] نمودار برش پایه ستون های چهار مدل نمایش داده شده است. اولین اتفاقی که در این چهار مدل می افتد شروع ترک هاست که سبب کاهش سختی ستون می شود. این کاهش سختی در مدل SMA-FRP بیشتر از سه مدل دیگر است و در مدل SS کمترین مقدار می باشد. با ادامه بارگذاری بعد از ترک خوردگی، ستون دچار تسلیم می شود که مدل SMA-FRP با تغییر شکل بیشتر و مقاومت کمتری نسبت به مدل های دیگر به نقطه تسلیم می رسد. افزایش تغییر مکان شکست که در مدل SMA-FRP نشان دهنده افزایش توان شکل پذیری ستون است. با تسلیم شدن ستون، بتن آن نیز شروع به خردشدگی می کند. تقریباً می توان گفت که شیب خرد شدگی در هر دو مدلی که در آن SMA وجود دارد کمتر از مدلیست که در آن فولادپیش تنیده وجود دارد.



شکل ۹- نمودار برش پایه ستون مورد مطالعه [۱۴]

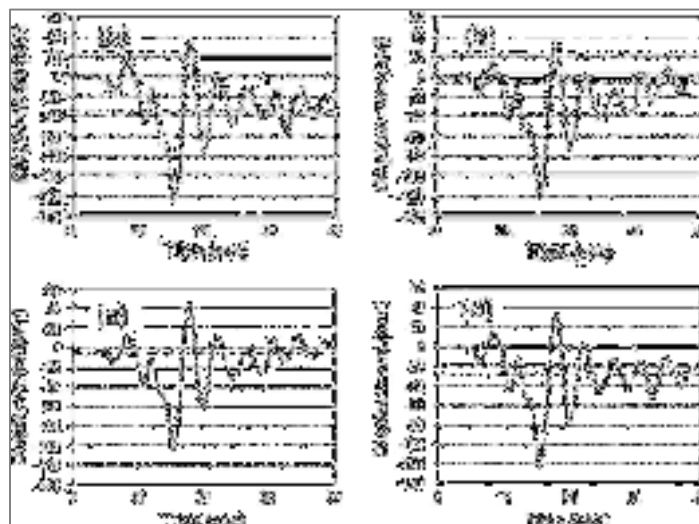
آلام و بیلا مدل خود را تحت ۲۰ شتاب نگاشت مختلف مورد تحلیل دینامیکی غیر خطی تاریخچه زمانی قرار دادند. در شکل (۱۰) [۱۴] میزان تغییر شکل ماندگار نمونه های موردنظر تحت تاثیر بیست زمین لرزه ارائه شده است. از آنجا که آرماتورهای SMA در این ستون ها دارای رفتار فوق کشسان هستند، تغییر شکل ماندگار کمتری در نمونه های مجهز به SMA مشاهده می شود و مدل های فولادی تغییر شکل ماندگار بیشتری دارند. برای مشاهده جزئیات بیشتری از رفتار یک ستون در طول یک زمین لرزه در شکل (۱۱) بخشی از تحلیل دینامیکی چهار مدل مذکور تحت شتاب نگاشت زمین لرزه لما پریتا نشان داده شده است. در این شکل روند کم شدن تغییر شکل ماندگار ستون ها مشهود است.



شکل ۱۰- میزان تغییر مکان جانبی ماندگار در چهار ستون مدل تحت بیست شتاب نگاشت گوناگون [۱۴]

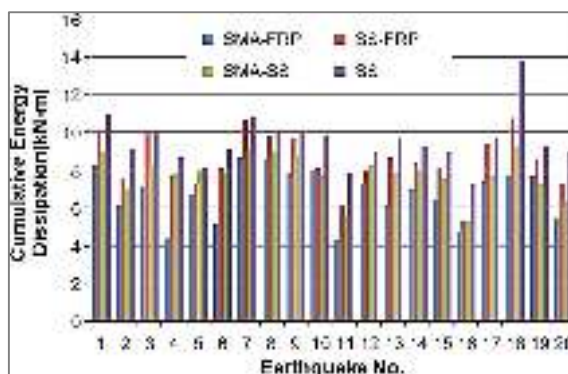
اگرچه آرماتور فوق کشسان توانسته است که میزان تغییر شکل پسماند ستون را کاهش دهد اما توان اتلاف انرژی یک آرماتور فوق کشسان از آرماتور فولادی به مراتب کمتر است. به همین دلیل در شکل (۱۲) [۱۴] مشاهده می شود توان اتلاف انرژی پایین است.^۱

❖ پژوهش های مهم دیگری [۱۵ و ۱۶] در زمینه استفاده از SMA در ستون بتنی صورت گرفته است.



شکل ۱۱- چهار ستون مورد مطالعه تحت شتابنگاشت لما پریتا [۱۴]

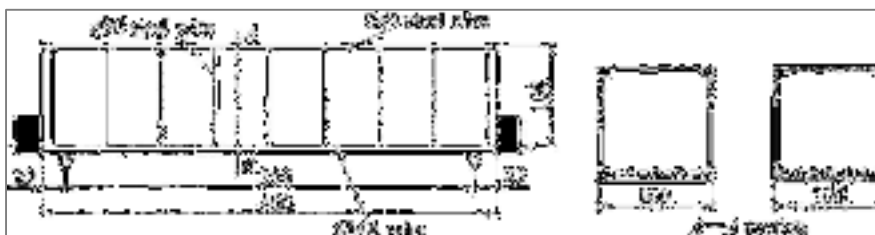
^۱ آرماتور های FRP به علت رفتار کاملا کشسان تقریبا توان اتلاف انرژی ندارند.



شکل ۱۲- میزان اتلاف انرژی در چهار ستون مدل تحت بیست شتاب نگاشت گوناگون [۱۴]

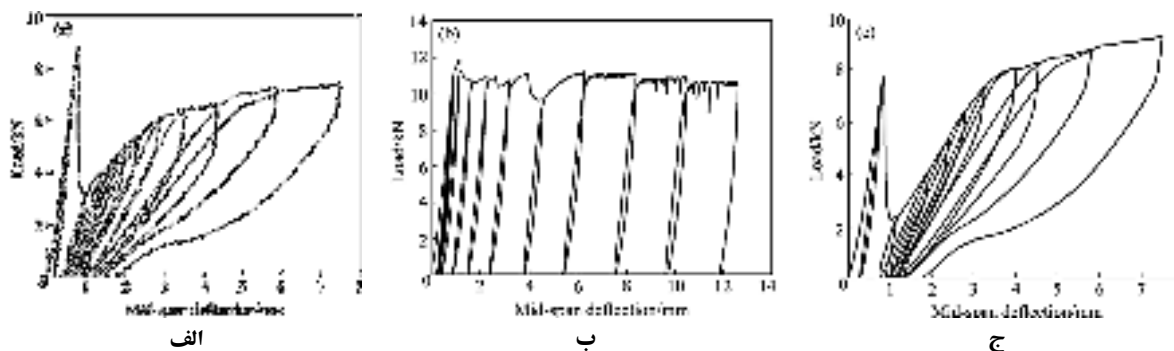
۲-۳- تاثیر آلیاژهای حافظه دار شکلی بر تیر بتنی

در سال ۲۰۰۸ کیوانگ یچووان^۱ و همکاران، به بررسی اصلاح تیرهای بتنی هوشمند توسط سیمهای SMA و چسب حاوی الیاف پرداختند [۱۷] که جوابگوی سوالاتی مثل، آیا آرماتور فوق کشسان عملکرد بهتری از آرماتور فولادی در مهار تغییر شکل ماندگار سازه دارد یا اگر آرماتور SMA پیش کشیده نباشد و تنها دارای رفتار فوق کشسان باشد نتیجه چطور خواهد بود، است. آن ها سه نمونه تیر در محیط آزمایشگاهی اجرا کردند. مشخصات هندسی این تیرها مطابق شکل (۱۳) [۱۷] است. در هر سه نمونه دو سیم فولادی به قطر ۴ میلی متر در بالای تیر تعبیه شده است. در مدل اول، دوم و سوم به ترتیب پنج سیم نیتینول در پایین تیر جایگذاری شده است. در تمام مدل ها قطر سیم های پایینی برابر ۲ میلی متر است.



شکل ۱۳- مشخصات ابعادی مدل (واحد به میلی متر) [۱۷]

در روند بارگذاری، یک بار چرخه ای به وسط هر یک از تیرها وارد می شود. شکل (۱۴) [۱۷] پاسخ سه نمونه را برحسب میزان خیز و نیروی وارده نشان می دهد. با توجه به شکل ۱۵ در مدل دوم خیز ماندگار میانه تیر تقریباً ۱۲ میلی متر و این رقم برای مدل اول برابر با ۲ میلی متر است. به عبارتی دیگر آرماتور SMA موجب شده که خیز ماندگار تیر اول ۸۳٪ نسبت به تیر دوم کمتر باشد. در مدل سوم که نیتینول بیشتری در آن وجود دارد، میزان این کاهش بیشتر و در حدود ۹۰٪ است. با مقایسه بهتر مدل اول و دوم مشاهده شد، در تغییر شکل های بزرگتر توان باربری مدل سوم بیشتر است. با وجود این مزیت های SMA، در تیر اول و سوم نقاط ضعفی نیز مشاهده شده است. از جمله این نقاط ضعف ها می توان به کاهش مقاومت تسلیم و توان اتلاف انرژی تیرهای مسلح شده با نیتینول فوق کشسان اشاره کرد. تیری که در آن آرماتور فولادی وجود داشته، هم در اتلاف انرژی و هم در مقاومت تسلیم از دو تیر دیگر بالاتر است.



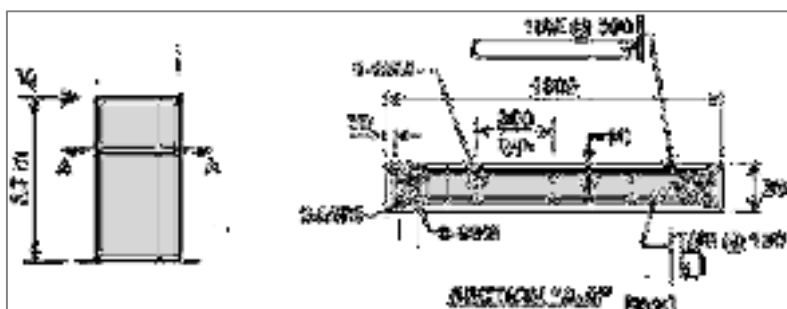
شکل ۱۴- نتایج بارگذاری تیرها (الف) مدل اول، (ب) مدل دوم، (ج) مدل سوم [۱۷]

¹ Kuang Ya-chuan

چوی و همکارانش نیز در تحقیقی تجربی در سال ۲۰۱۸ [۱۸]، با عنوان اثرات تیرهای تقویت شده با فیبرهای SMA بر روی کنترل ترک و ترک خوردگی انجام دادند که نتایج این آزمایش نیز بیانگر کارایی مثبت SMA در تیر بتنی بوده است بطوریکه عرض ترک های برشی و خمشی کاهش پیدا کرده بود. ❖ تحقیقات دیگری [۱۹] در زمینه استفاده از SMA در تیر بتنی انجام شده است.

۳-۳- اثر آلیاژهای حافظه دار شکلی بر دیوار برشی بتنی

مطالعه ای تحت عنوان بهبود لرزه‌ای دیوارهای برشی بتنی با استفاده از آلیاژهای حافظه‌دار شکلی توسط قاسمیه^۱ به همراه مصطفی زاده^۲ و صابر دل^۳ در سال ۲۰۱۰ [۲۰] صورت گرفت. رفتار دیوار برشی بتن مسلح بدون بازشو را با درصدهای مختلف با استفاده از آلیاژ حافظه‌دار به جای آرماتورهای طولی فولادی تحت بارهای لرزه‌ای بررسی شد. در این پژوهش، ۶ مدل که مشخصات آن در جدول (۲) آمده است، توسط برنامه اجزای محدودی آباکوس مدل سازی شد. آرماتورهای فوق کشسان از جنس نیتینول با درصدهای مختلف در دیوار برشی جایگذاری شد. این آرماتورها به صورت افقی و عمودی در دیوار تعبیه شد. مدل های انتخابی ابتدا بدون SMA توسط مدل‌های تجربی قربانی-رنانی [۲۱] مطابق شکل (۱۵) آزمایش شدند.



شکل ۱۵- مدل قربانی-رنانی [۲۱]

جدول ۲- مشخصات مکانیکی مواد [۲۰]

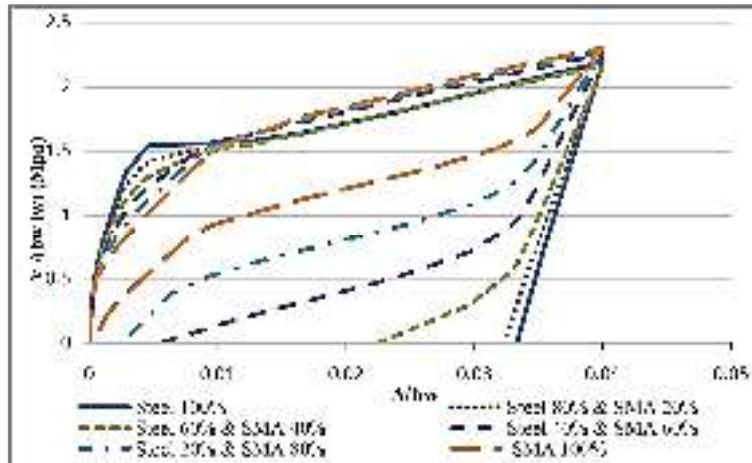
مشخصات مکانیکی	f'_c, MPa	E_c, MPa	ν_c	$\rho, KN/m^3$
بتن	۲۸,۳	۲۹,۱۴	۰,۲۲۳	۲۸
فولاد	-	۲۱۰	۰,۳	۷۸

دیوارهای برشی مدل شده تحت بارگذاری رفت و برگشتی قرار گرفتند. در شکل (۱۶) [۲۰] نتایج حاصل از این بارگذاری رفت و برگشتی برحسب نیروی برشی پایه به تغییر مکان راس دیوار ارائه شده است. در این شکل مشاهده می شود که با افزایش درصد SMA، دیوار دارای رفتاری نرم تر می شود و میزان تغییر شکل ماندگار آن کاهش می یابد. از طرف دیگر مقاومت تسلیم دیوار مجهز به SMA نسبت به نمونه فولادی کمتر است اما در تغییر شکل های بزرگتر دارای مقاومت جانبی بیشتری است.

¹Ghassemieh

² Mostafazadeh

³ Saberdel



شکل ۱۶- نتایج بارگذاری استاتیکی یکنواخت اعمال شده به بالاترین نقطه دیوار [۲۰]

در جدول (۳) [۲۰] مشاهده می شود که افزایش درصد آرماتورهای SMA توانسته درصدی از تغییر شکل ماندگار را کاهش دهد که این میزان در مدل ششم تقریباً ۱۰۰٪ است. در طول این بارگذاری مطمئناً بتن دیوار دچار ترک خوردگی می شود و این ترک ها در طول دیوار گسترش پیدا می کنند. باید توجه کرد، در جایجایی های یکسان، دیوارمجهز به SMA مقدار ترک خوردگی کمتری دارد که این امر نشان دهنده بهبود عملکرد این نوع دیوارها در برابر بارگذاری یکنواخت است.

جدول ۳- میزان جایجایی ماندگار و درصد کاهش فروپاشی در دیوار برشی بتنی در مقایسه با فولاد ۱۰۰ درصد [۲۰]

درصد میلگرد	جایجایی ماندگار (Δ/hw)	درصد کاهش جایجایی پسماند
فولاد ۱۰۰٪	۰,۰۳۳۳۳	۰٪
SMA ۲۰٪ و فولاد ۸۰٪	۰,۰۳۲۳	۳٪
SMA ۴۰٪ و فولاد ۶۰٪	۰,۰۲۲۵	۳۲٪
SMA ۶۰٪ و فولاد ۴۰٪	۰,۰۰۵۷	۸۳٪
SMA ۶۰٪ و فولاد ۲۰٪	۰,۰۰۲۶	۹۲٪
SMA ۱۰۰٪	۰,۰۰۰۴	۹۸٪

پالرمو^۱ و آلام^۲ پژوهشی که در سال ۲۰۱۷ انجام شد، به بررسی رفتار دیوار برشی بتنی تقویت شده توسط SMA [۲۲] پرداختند که SMA (همانطور که گفته شد) باعث بهبود عملکرد دیوار برشی در هنگام زلزله می شود. ❖ در بخش استفاده از آلیاژهای حافظه دار شکلی در دیوار برشی بتنی مقالات دیگری [۲۳][۲۴] نیز کار شده است.

۳-۴- تاثیر آلیاژ حافظه دار شکلی در یک سازه کامل بتنی

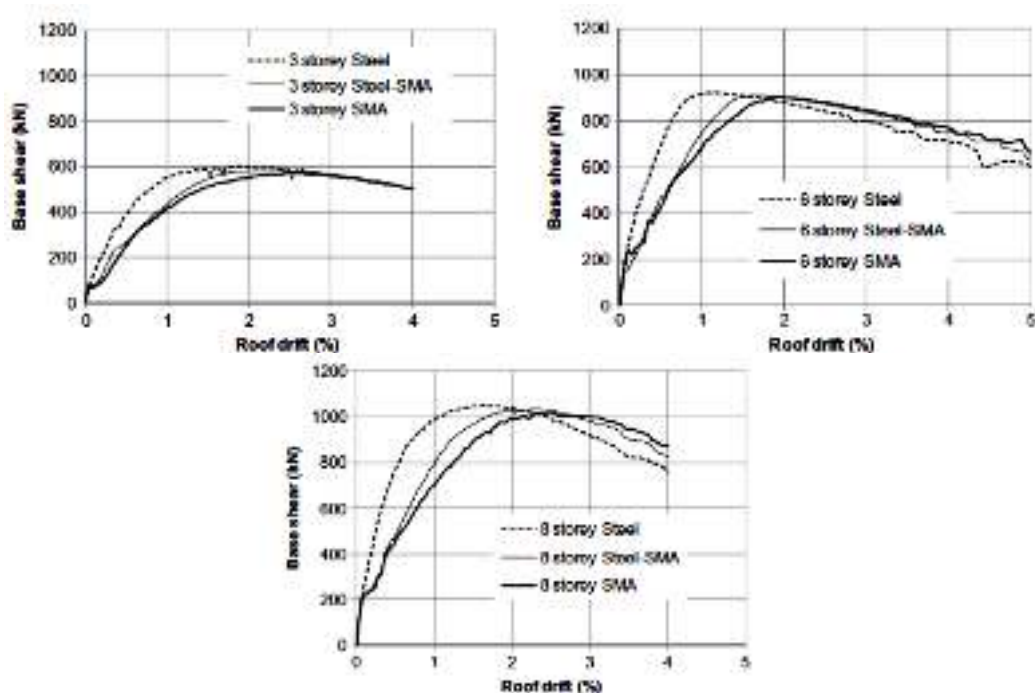
در سال ۲۰۱۲ آلام و همکارانش [۲۵]، استحکام بالای لرزه ای و انعطاف پذیری سازه های بتنی تقویت شده توسط آلیاژهای فوق کشسان حافظه دار شکلی را مورد بررسی قرار دادند. مدل های ۳، ۶ و ۸ طبقه ساختمان بتنی در نظر گرفته شد که دارای سه حالت شامل فقط فولاد (steel)، استفاده از میلگرد SMA در مناطق خمیری تیرها و دیگر مناطق فولاد معمولی باشد (steel-SMA) و تمام تیرها از میلگرد SMA باشد و دیگر مناطق فولاد معمولی باشد (SMA)، بود. آنها از تحلیل غیر خطی استاتیکی بارافزون برای بدست آوردن انعطاف پذیری و مقاومت تمامی مدل ها استفاده کردند. سپس آنالیز غیرخطی دینامیکی تاریخچه زمانی را با استفاده از ده رکورد زلزله برای تعیین تقاضا و ظرفیت لرزه ای از نظر برش پایه و تغییر مکان جانبی برای تمامی مدل ها استفاده شده است. ساختمان ها دارای شرایط شکل پذیری متوسط در شهر ونکوور کانادا با شرایط لرزه ای آن منطقه و براساس استانداردهای CSA طراحی شده اند.

¹ Dan palermo

² Alaa Abdulridha

نتایج حاصل از تجزیه و تحلیل بارافزون نشان می دهد قاب SMA شبیه به قاب فولادی است که حداکثر تفاوت در هر دسته تنها ۸٪ است. مقادیر انعطاف پذیری برای انواع قاب ها بر اساس رفتارهای کشسان-خمیری ایده آل شده محاسبه شده است. انعطاف پذیری برای قاب SMA حداقل ۱۶٪ کمتر در مقایسه با قاب steel است که در آن حداکثر تغییرات ۲۴٪ است در حالی که در مورد قاب steel-SMA، محدوده انعطاف پذیری متفاوت از ۸٪ تا ۱۸٪ نسبت به قاب steel است. این امر هم به دلیل ضریب کشسانی پایین SMA است که سبب کاهش سختی قاب SMA و قاب Steel-SMA می شود و تغییر مکان جانبی بالاتر برای رسیدن به ظرفیت برشی پایه می شود. شکل (۱۷) منحنی بار افزون قاب های ۳، ۶ و ۸ طبقه را نشان می دهد.

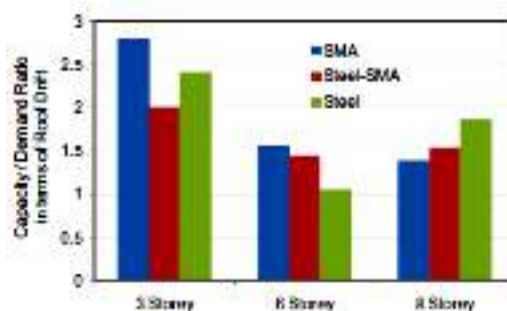
نتایج حاصل از تجزیه و تحلیل غیر خطی دینامیکی تاریخچه زمانی نشان می دهد که قاب های SMA تا ۶ طبقه ساختمان های لرزه ای موثرتری هستند، زیرا نسبت تقاضای ظرفیت برای برش پایه و تغییر مکان جانبی سقف بیشتر است. قاب steel-SMA در مقایسه با قاب steel رفتار لرزه ای موثرتری دارد اما تاثیرش از قاب SMA کمتر است. قاب های steel در ایجاد سطوح بین طبقه و تغییر مکان جانبی سقف مدل ۸ طبقه در مقایسه با قاب های بتنی SMA موثرتر هستند. با این حال، ظرفیت برش پایه به نسبت تقاضای آن کمتر از قاب SMA است. بنابراین، در مناطق لرزه ای به دلیل ظرفیت بالاتری نسبت به تقاضای لرزه ای آن، سازه های SMA ممکن است به نسبت سازه های steel بهتر عمل کنند.



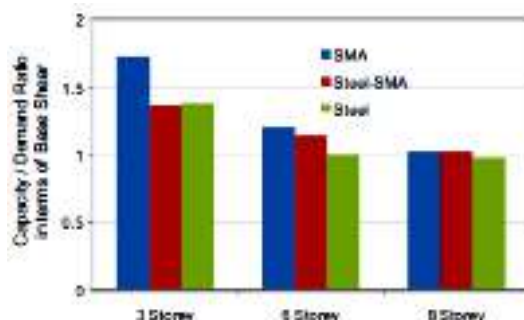
شکل ۱۷- منحنی های بارافزون (برش پایه غیرخطی تحت آرماتورگذاری های مختلف) برای قاب های ۳، ۶ و ۸ طبقه [۲۵]

نتایج دیگر نشان داد، عملکرد قاب steel-SMA در اغلب موارد شبیه به قاب SMA بوده است. آلیاژهای حافظه ای شکل مواد گران قیمتی هستند. برای پایین آوردن هزینه اولیه ساخت و ساز، استفاده از قاب steel-SMA ممکن است در مقایسه با ساختار SMA در مناطق لرزه ای امکان پذیر باشد. شکل (۱۸) و شکل (۱۹) به ترتیب ظرفیت تغییرمکان جانبی طبقه به نسبت تقاضا و ظرفیت برش پایه لرزه ای به ضریب تقاضا در قاب های موردنظر را نشان می دهد.

❖ در بخش استفاده از SMA در یک سازه کامل بتنی مقالات زیاد دیگری [۲۴-۲۶] نیز کار شده است.



شکل ۱۸- ظرفیت تغییر مکان جانبی طبقه به نسبت تقاضای انواع قاب های بتن مسلح با طبقات مختلف [۲۵]



شکل ۱۹- نسبت ظرفیت برش پایه لوزه ای به ضریب تقاضا [۲۵]

۴- انواع نرم افزارهای مدل سازی SMA

بیش تر کاربردهای آلیاژ حافظه دار در مهندسی عمران به استفاده از آنها به عنوان میلگرد و مفتول ربط دارد. بسیاری از محققان مدل‌هایی یک بعدی برای رفتار این میلگردها ارائه داده‌اند. رفتار فوق کشسان میلگردهای آلیاژ حافظه دار در تعدادی از نرم‌افزارهای المان محدود، ارائه داده شده است. برای مدل سازی آلیاژهای حافظه دار شکلی از نرم افزار های متفاوتی استفاده می شود که هر کدام را با ذکر نام به تشریح مختصری از آن ها می پردازیم [۲۸].

۴-۱- نرم افزار اپنسیس (opensees) :

یکی از نرم افزارهای تحلیل سازه ها در رشته مهندسی عمران بوده که در سال ۱۹۹۰ توسط محققین دانشگاه برکلی آمریکا تهیه شده و از آن زمان تاکنون در حال توسعه مداوم می باشد. این نرم افزار شامل مجموعه کاملی از انواع المان ها، مصالح و روش های مختلف تحلیل بوده و توانایی مدل سازی و تحلیل را در زمینه های میکرو و ماکرو دارا می باشد. این نرم افزار در مدل کردن و تحلیل های گوناگون SMA هیچ مشکلی ندارد. باید توجه کنید که تنها در نسخه ۲,۰,۰ این نرم افزار، این ماده موجود است و با خطا مواجه نمی شود اما در نسخه های دیگر به عنوان ماده self-centering می شناسد و کدهای مدنظر در سایت برکلی موجود است.

۴-۲- نرم افزار سائزمو استراکت (seismostruct) :

یک نرم افزار المان محدود است که قابلیت نشان دادن رفتار سازه ها را با در نظر گرفتن خواص غیر خطی و غیرکشسان بودن مصالح، تحت اثر بارهای دینامیکی و استاتیکی دارد. این برنامه قابلیت قبول کردن بارهای استاتیکی و دینامیکی و قابلیت انجام آنالیز های بارافزون استاتیکی غیر خطی و دینامیکی غیر خطی را دارا می باشد. همچنین نیرو های استاتیکی شامل (نیرو و تغییر مکان) و یا بارهای دینامیکی شامل (شتاب یا تغییر مکان) را قبول می کند و دارای قابلیت انجام آنالیز های مقادیر ویژه نیز می باشد. همچنین این نرم افزار قابلیت در نظر گرفتن خواص غیر خطی هندسی و غیر کشسان بودن مصالح، هر دو را بطور همزمان دارا می باشد. این نرم افزار قابلیت شبیه سازی SMA با در نظر گرفتن ارتعاش زمین به همراه شدت های مختلف و استفاده از شتابنگاشت های متفاوت، امکان تحلیل دینامیکی غیرخطی را دارد.

۴-۳- نرم افزار آباکوس (Abaqus) :

نرم افزاری بسیار قدرتمند برای تحلیل و آنالیز اعضا و المان های مهندسی در رشته های عمران، مکانیک، هوافضا و ... بر پایه محاسبات المان محدود (FEM) می باشد. پیدایش آباکوس به سال ۱۹۷۸ بر می گردد. توانایی این نرم افزار در مدل سازی، تحلیل و نمایش دقیق نتایج در آنالیز تیرها و

¹ Open System For Earthquake Engineering Simulation

² Finite Element Method

ستون ها، ارائه نحوه خراب شدگی و ترک خوردگی المان های فولادی، بتنی و المان های بنایی در سازه ها و نشان دادن زوال سختی و مقاومت از توانایی های جذاب نرم افزار آباکوس برای مهندسان عمران می باشد. این نرم افزار در مدل کتابخانه ی خود مدل آلیاژ حافظه دار را ندارد اما با نوشتن کدهای موجود می توان آنها را به نرم افزار معرفی کرد. باید در نظر داشته باشید با این کدها تنها می توان تحلیل استاتیکی در این نرم افزار انجام دهید.

۴-۴- نرم افزار انسیس (Ansys)!

یکی از نرم افزارهای قدرتمند برای تحلیل انواع سازه های مکانیکی می باشد که به روش اجزاء محدود به آنالیز مسائل می پردازد و برای اولین بار در سال ۱۹۷۰ توسط جان سواسون در شرکت آمریکایی ANSYS Inc ارائه شد. این نرم افزار به دلیل دارا بودن مدل میلگرد SMA، توانایی تحلیل جزئی در اتصال، قدرت دقیق نشان دادن محل دقیق ترک ها و حتی جهت ترکها به عنوان نرم افزار شبیه سازی را دارد [۲۹].

۵- نتیجه گیری

هدف از این مطالعه بیان امکان استفاده از آلیاژهای حافظه دار شکلی در سازه های بتنی بود. نمونه هایی از مطالعات مختلف نشان داد که این آلیاژها می توانند بر روی سازه های بتنی تاثیر قابل ملاحظه و مثبتی داشته باشند. در ستون های بتنی علاوه بر ایجاد محصورشدگی موثر در هسته بتنی ستون، سبب کاهش تغییرشکل ماندگار در ستون پس از بارگذاری های سنگین جانبی (مانند زلزله) می شوند. در تیرهای بتنی این آلیاژها سبب خودترمیمی و بستن ترک های تیر می شوند. این آلیاژها در ایجاد پیش تنیدگی در تیرهای بتنی کاربرد دارند و می توانند بسته به دمای دریافتی خیز معکوس ایجاد کنند. در دیوار برشی مجهز به این آلیاژها رفتاری مشابه با رفتار ستون ها را دارند. در این دیوارها آلیاژ حافظه دار شکلی میزان گسترش ترک و تغییر شکل ماندگار را کاهش می دهد و شکست دیوار برشی را به تاخیر می اندازد. و در آخر با استفاده از این آلیاژها در ساختمان کامل بتنی مشاهده می شود، نسبت توان به تقاضای سازه افزایش می یابد که این امر نکته بسیار مثبتی در استفاده از آلیاژ های حافظه دار شکلی در سازه های بتنی می باشد.

مراجع

- [۱] Song, G., Ma, N., Li, H. N. (۲۰۰۶). "Applications of shape memory alloys in civil structures". Eng. Struct., vol. ۲۸, no. ۹, pp. ۱۲۶۶-۱۲۷۴.
- [۲] Menna, C., Auricchio, F., Asprone, D. (۲۰۱۴). "Applications of Shape Memory Alloys in Structural Engineering". Elsevier Ltd.
- [۳] قاسمیه، م.، رضایپور، م. (۱۳۹۵). "کاربرد آلیاژهای حافظه دار شکلی در مهندسی سازه". انتشارات سازمان جهاد دانشگاهی.
- [۴] Concilio, Lecce, A. L. (۲۰۱۵). "Historical Background and Future Perspectives". in Shape Memory Alloy ENGINEERING for Aerospace, Structural and Biomedical Applications, Elsevier Ltd, pp. ۳-۳۰.
- [۵] Alam, M. S., Youssef, M. A., Nehdi, M. (۲۰۰۷). "Utilizing shape memory alloys to enhance the performance and safety of civil infrastructure: a review". Can. J. Civ. Eng., vol. ۳۴, no. ۹, pp. ۱۰۷۵-1086.
- [۶] Maji, A. K., Negret, I. (۱۹۹۸). "Smart Prestressing with Shape-Memory Alloy". J. Eng. Mech., vol. ۱۲۴, no. ۱۰, pp. ۱۱۲۱-۱۱۲۸.
- [۷] Shin, M. (۲۰۱۲). "Seismic retrofit and repair of reinforced concrete bridge columns using shape memory alloy spirals [Theses]". University of Illinois at Urbana-Champaign.
- [۸] اشرفی، ح. م.، بیرانوند، پ. (۱۳۹۶). "آلیاژهای حافظه دار شکلی فرصت عرضه خاصیت فوق ارتجاعی در سازه های بتن آرمه". نشریه مهندسی عمران و سازه، دوره ۱، شماره ۱.
- [۹] Ölander, A. (۱۹۳۲). "An electrochemical investigation of solid cadmium-gold alloys". J. Am. Chem. Soc., vol. ۵۴, no. ۱۰, pp. ۳۸۱۹-۳۸۳۳.
- [۱۰] Greninger, A. B., Mooradian, V. G. (۱۹۳۸). "Strain transformation in metastable beta copper-zinc and beta copper-Ti alloys". AIME TRANS, vol. ۱۲۸, pp. ۳۳۷-۳۶۹.
- [۱۱] Chang, L. C., Read, T. A. (۱۹۵۱). "Plastic deformation and diffusionless phase changes in metals—The gold-cadmium beta phase". JOM, vol. ۳, no. ۱, pp. ۴۷-52.
- [۱۲] Buehler, W. J., Wiley, R. C. (۱۹۶۵). "Nickel-Base Alloys". US Patent ۳۱۷۴۸۵۱.

- [۱۳] Rozner, A. G., Buehler, W. J. (۱۹۶۷). "High strength nickel-base alloys". ۰۷-Nov.
- [۱۴] Billah, A. H. M., Alam, M. (۲۰۱۲). "Seismic performance of concrete columns reinforced with hybrid shape memory alloy (SMA) and fiber reinforced polymer (FRP) bars". *Constr. Build. Mater.*, vol. ۲۸, no. ۱, pp. ۷۳۰-۷۴۲.
- [۱۵] Zafar, A., Andrawes, B. (۲۰۱۵). "Seismic behavior of SMA – FRP reinforced concrete frames under sequential seismic hazard". *Eng. Struct.*, vol. ۹۸, pp. ۱۶۳-۱۷۳, ۲۰۱۵.
- [۱۶] Soltanieh, G., Kabir, M. Z., Shariyat, M. (۲۰۱۷). "A robust algorithm for behavior and effectiveness investigations of super-elastic SMA wires embedded in composite plates under impulse loading". *Compos. Struct.*, vol. ۱۷۹, pp. ۳۵۵-۳۶۷.
- [۱۷] KUANG Ya-chuan, O. J. (۲۰۰۸). "Passive smart self-repairing concrete beams by using shape memory alloy wires and fibers containing adhesives". *Huagong Xuebao/CIESC J.*
- [۱۸] Choi, E., Mohammadzadeh, B., Kim, D., Jeon, J.S. (۲۰۱۸). "A new experimental investigation into the effects of reinforcing mortar beams with superelastic SMA fibers on controlling and closing cracks". *Compos. Part B Eng.*, vol. ۱۳۷, pp. ۱۴۰-۱۵۲, ۲۰۱۸.
- [۱۹] Alam, M. S., Nehdi, M., Youssef, M. A. (۲۰۰۸). "Exploratory study of seismic behaviour of repaired Beam-Column Joint reinforced with superelastic Shape Memory Alloys". In *Annual Conference of the Canadian Society for Civil Engineering ۲۰۰۸*, vol. ۳, pp. ۱۴۷۶-۱۴۸۳.
- [۲۰] Sadeh, M. S., Mostafazadeh, M., Ghassemieh, M. (۲۰۱۰). "Seismic Enhancement of Concrete Shear Walls Structures by Shape Memory Alloys," no. September, pp. ۲۷-۳۰.
- [۲۱] Ghorbani-Renani, I., Velev, N., Tremblay, R., Palermo, D., Massicotte, B., Léger, P. (۲۰۰۹). "Modeling and testing influence of scaling effects on inelastic response of shear walls". *ACI Struct. J.*, vol. ۱۰۶, no. 3, p. 358.
- [۲۲] Abdulridha, A., Palermo, D. (۲۰۱۷). "Behaviour and modelling of hybrid SMA-steel reinforced concrete slender shear wall". *Eng. Struct.*, vol. ۱۴۷, pp. ۷۷-۸۹, ۲۰۱۷.
- [۲۳] Zaidi, M. (۲۰۱۶). "Experimental Testing and Reliability Analysis of Repaired SMA and Steel Reinforced Shear Walls". no. August.
- [۲۴] Maciel, M., Palermo, D., Abdulridha, A. (۲۰۱۴). "Special Topics in Structural Dynamics". vol. ۶, pp. 185-192.
- [۲۵] Alam, M. S., Moni, M., Tesfamariam, S. (۲۰۱۲). "Seismic overstrength and ductility of concrete buildings reinforced with superelastic shape memory alloy rebar". *Eng. Struct.*, vol. ۳۴, pp. ۸-۲۰, ۲۰۱۲.
- [۲۶] Shiravand, M. R., Nashtae, M. A., Veismoradi, S. (۲۰۱۷). "Seismic assessment of concrete buildings reinforced with shape memory alloy materials in different stories". *Struct. Des. Tall Spec. Build.*, no. October ۲۰۱۶, p. e۱۳۸۴.
- [۲۷] Tamai, H., Kitagawa, Y. (۲۰۱۵). "Pseudoelastic behavior of shape memory alloy wire and its application to seismic resistance member for building". *Comput. Mater. Sci.*, vol. ۲۵, no. ۱-۲, pp. ۲۱۸-۲۲۷, ۲۰۰۲.
- [۲۸] Barbarino, S. (۲۰۱۵). "SMAs in Commercial Codes". Elsevier Ltd, ۲۰۱۵.
- [۲۹] Barrett, P. R., & Fridline, D. (۲۰۰۲). "User implemented nitinol material model in ANSYS". In *Tenth International ANSYS Conference and Exhibition*, Pittsburgh, PA, Pittsburgh: Computer Aided Engineering Associates, Inc (pp. ۱-۶).
- [۳۰] "<https://www.radyab.co>".

